

## PENGUKURAN TEGANGAN SISA PLAT BAJA STRUKTUR NON STANDAR A-2 ROL PANAS DENGAN TEKNIK DIFRAKSI NEUTRON

Parikin, Nurdin Effendi, Andon Insani, Agus Hadi Ismoyo

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir - BATAN  
Kawasan Puspiptek Serpong Tangerang, BANTEN 15314  
E-mail: farihin@batan.go.id

### ABSTRAK

**PENGUKURAN TEGANGAN SISA PLAT BAJA STRUKTUR NON STANDAR A-2 ROL PANAS DENGAN TEKNIK DIFRAKSI NEUTRON.** Pengukuran tegangan sisa bahan struktur plat baja austenitik (A-2) (FeCrNi) hasil mekanisasi rol panas telah dilakukan di PTBIN- BATAN. Studi ini dilatarbelakangi oleh pemanfaatan proses pengerolan pada komponen bahan struktur konstruksi yang sangat diminati karena menawarkan rasio kekuatan beban sangat baik, dan dalam rangka penerapan bahan vital yang memerlukan persyaratan khusus ketika faktor keselamatan menjadi prioritas utama. Empat buah spesimen disiapkan dalam kegiatan ini; satu sebagai bahan referensi yang tidak dirol (A2D0n), dan tiga buah spesimen lain (A2D2n, A2D3n dan A2D5n) diberi perlakuan rol panas dengan kuantitas reduksi berbeda, yakni: 71%, 81% dan 87%. Hasil memperlihatkan bahwa: pengerolan hingga reduksi 71% membangkitkan peregang kisi sebesar 0,25% dan tegangan sisa tarik sebesar 9,7 MPa sedangkan peregang kisi sebesar 0,27% dan tegangan sisa terbesar 10,2 MPa terjadi pada reduksi 81%. Selanjutnya peregang kisi dan tegangan sisa meluruh kembali berturut-turut hingga 0,23% dan 8,3 MPa terjadi pada reduksi pengerolan panas sebesar 87%. Disimpulkan bahwa: peningkatan peregang bahan baja austenitik-2 terjadi akibat pergeseran bidang-bidang kristal (*slip plane*) oleh mekanisme pengerolan yang mampu meningkatkan kekuatan mekanik bahan berupa penguatan regangan (*strain hardening*), dan fenomena kecenderungan distribusi tegangan sisa bahan struktur austenitik-2 adalah tegangan tarik (*tensile stress*).

Kata Kunci : plat baja FeCrNi, rol panas, tegangan sisa, difraksi neutron.

### ABSTRACT

**RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS ON HOT ROLLED A-2 NON STANDARD STEEL STRUCTURAL PLATES BY USING NEUTRON DIFFRACTION TECHNIQUES.** Measurements of hydrostatic residual stress distribution in hot rolled Austenitic steels (A-2) (FeCrNi) plates have been carried out in PTBIN-BATAN. The motivation for this study is the utilization of the rolling process on structural construction component material. This method is widely popular because it offers a good strength to load ratio for the application of vital materials that needed special requirements such as safety factor as primary condition. Four specimens were provided in this study: one specimen (unrolled) as a reference called A2D0n; three are rolled specimens called: A2D2n, A2D3n and A2D5n, with reduction 71%, 81% and 87% respectively. The results show that the reduction of 71% in hot rolling can generate the lattice strains and the stresses of about 0.25% and 9.7 MPa respectively. While the 0.27% strains and the 10.2 MPa stresses appeared in 81% reduction of rolling. The strains and the stresses reverted back into 0.23% and 8.3 MPa respectively; after hot rolled at 87% in reduction. In summary: the rise of straining in austenitic-2 was affected by the shifting of crystal plane due to rolling mechanism that can increase the mechanical strength by strain hardening of the materials. The residual stress distribution in structural materials of austenitic-2 was tensile stresses.

Keywords : FeCrNi steel, hot rolling, residual stress, neutron diffraction



## PENDAHULUAN

Pemanfaatan proses pengerolan pada komponen bahan struktur konstruksi sangat diminati oleh karena rasio kekuatan terhadap beban, fabrikasi yang sederhana dan kemudahan dalam angkat-pasang. Proses ini adalah sebuah deformasi yang dilakukan di sekitar temperatur kristalisasi logam. Tak terbantahkan bahwa proses pengerolan logam sangat berperan penting dan tidak dapat dipisahkan dari rantai produksi. Kebutuhan bentuk dan ketebalan yang berbeda dalam suatu konstruksi memberikan kenyamanan dan mempermudah pemasangan fungsi. Tetapi selama dilakukan proses fabrikasi itu, boleh jadi distribusi *strain energy* dalam bahan berubah, khususnya di dekat daerah permukaan. Energi peregang (*strain energy*) dalam butiran bahan menjadi tidak homogen dan menimbulkan tegangan internal. Tegangan ini disebut tegangan sisa, yang didefinisikan sebagai tegangan yang boleh jadi muncul dalam benda *solid elastis* saat seluruh beban *external* dihilangkan<sup>[1]</sup>. Hasil penelitian pengaruh pengerolan dingin (temperatur ruang) terhadap bahan baja tipe SS-304 dilaporkan oleh<sup>[2]</sup>, bahwa tegangan sisa dalam bahan terjadi akibat *mismatch* ekspansi termal antara fasa martensit dan austenit, yang masing-masing mengalami tegangan tekan dan tegangan tarik. Penambahan reduksi pengerolan mampu meningkatkan fraksi fasa martensit dan tegangan sisa tekan. Dalam literatur<sup>[2]</sup> ini dijelaskan pula formulasi perhitungan regangan dan tegangan sisa secara kristalografi.

Pada pola difraksi, kejadian peregang kisi dapat ditentukan dari besarnya angka pergeseran puncak suatu bidang refleksi. Sedang fenomena dinamika peregang kisi dapat ditelusuri dari lebar setengah maksimum puncak difraksi, yang diformulasikan melalui medan regangan. Regangan yang timbul dapat dievaluasi dari parameter kisi dan maksimum lebar setengah puncak. FWHM, menggunakan analisis garis pelebaran *shearer*<sup>[3]</sup> dan metode Rietveld<sup>[4]</sup>. Analisis ini dapat memberikan kuantitas tegangan sisa dalam bahan. Dalam metode Rietveld, penghalusan kuadrat terkecil dilakukan hingga fitting terbaik dicapai antara seluruh pola difraksi yang teramati dan seluruh pola intensitas penghitungan, yang didasarkan pada model penghalusan simultan, efek difraksi optik, faktor instrumen dan karakteristik lain seperti parameter kisi, sesuai

keinginan dan pemodelan. Kunci penyelesaiannya adalah *feedback* selama penghalusan, antara kemampuan pengetahuan struktur dan alokasi pengamatan intensitas terhadap refleksi Bragg individu yang saling tumpang tindih sebagian.

PTBIN BATAN telah mensintesis beberapa paduan FeCrNi dengan metode *cor foundry*, yang dinamai dengan tipe F1, F2, A1 dan A2<sup>[5]</sup>, yang dibedakan dalam komposisi dopan yang dicampurkan. Tipe ini didasarkan pada jenis feritik dan austenitik, dan masih dalam proses karakterisasi beberapa sifat unggul dan performa bahannya oleh Nurdin E dkk<sup>[5]</sup>. Studi bertujuan untuk mengamati pengaruh rol panas yang dilakukan di atas temperatur rekristalisasi terhadap tegangan sisa bahan struktur baja FeCrNi (austenitik-2) hasil peleburan mandiri. Pengukuran untuk pemeriksaan tegangan sisa ini sangat penting dalam rangka penerapan bahan vital yang memerlukan persyaratan khusus ketika umur pakai/keandalan bahan dan keselamatan menjadi prioritas utama.

## TEORI DAN METODE

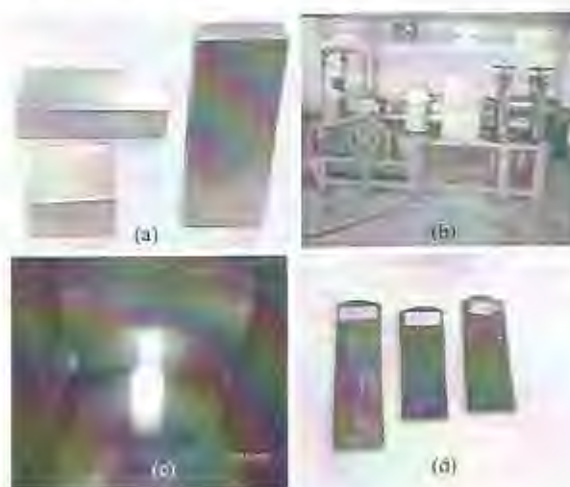
Penelitian dalam rangka pengembangan bahan struktur ini dilakukan di Puspiptek Serpong dan sekitarnya. Bahan baku besi *scrap* dan unsur dopan pepadu diperoleh dari pasaran. Baja paduan FeCrNi (austenitik; A2) dengan komposisi seperti tersusun dalam Tabel 1, dibuat mandiri secara *cor foundry* di Pusat Penelitian Metalurgi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Hasil proses masing-masing dan pembentukan spesimen terlihat pada Gambar 1. Perumusan  $\varepsilon = (d-d_0)/d_0$  dan  $\sigma = (E/(1-2\nu))\varepsilon$  digunakan untuk menghitung peregang kisi dan tegangan sisa hidrostatik sepanjang arah kristalografi tertentu. Untuk mendapatkan bahan *fresh/virgin* ( $d_0$ ), baja austenitik-2 dinormalisasi pada suhu 700°C selama 3 jam, dengan laju kenaikan dan pendinginan sebesar 15,4 °C/menit. Setelah mencapai kondisi temperatur kamar bahan di-*running* dengan difraktometer neutron berpanjang gelombang 1,8195 Angstrom dengan jangkauan pengukuran  $2\theta = 10^\circ$  sampai dengan  $2\theta = 160^\circ$  dengan langkah  $0,05^\circ$  menggunakan *step counting*.



Tabel 1. Komposisi (%wt) unsur pada Baja Austenitik-2

Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	Impuritas
57,74	15,42	25,01	0,32	0,96	0,34	Ti= 0,002
						S=0,008
						P=0,0163
						V=0,039
						Cu=0,051
						Nb=0,0053

Dalam kegiatan ini telah disiapkan 4 buah spesimen baja struktur reaktor austenitik A2 seperti tersusun pada Gambar 1 dan Tabel 2. Tiga (3) buah spesimen dilakukan eksperimen pengerolan panas berkondisi temperatur sekitar 1100 °C. Proses pengerolan panas dilakukan dengan reduksi 0,1 mm per *pass* dari ketebalan tertentu hingga ketebalan lebih kurang mencapai ketebalan plat pipa/vessel dalam reaktor (7 mm). Spesifikasi ini sesuai dengan deformasi antara sekitar 60% dan 90% reduksi ketebalan bahan. Terakhir hasil pengerolan panas di-*quench* dalam air, agar pemulihan bahan dapat dihambat dan memunculkan sifat tekstur rol. Sebagai kelengkapan data karakterisasi spesimen hasil pengerolan ini, dilakukan pula pengukuran kekerasan Vickers dan pengamatan strukturmikro dan dibandingkan dengan kondisi spesimen awal (*as cast*). Kemudian pengujian difraksi pada spesimen juga dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh nilai tegangan sisa bahan sebagai efek proses pengerolan panas.



Gambar 1. Spesimen baja A2: (a) hasil cor *foundry*, (b) mesin rol, (c) prose rol panas dan (d) spesimen hasil rol panas

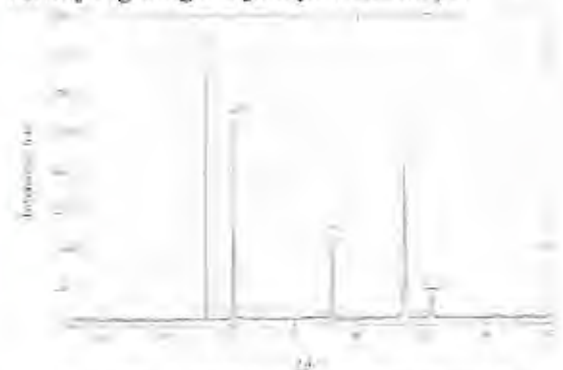
Tabel 2. Spesimen Baja Struktur Austenitik A2

Spesimen	Reduksi (%)	Keterangan
A2D0n	0	referensi; $d_0$
A2D2n	71	$d_1$
A2D3n	81	$d_2$
A2D5n	87	$d_3$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 memperlihatkan data baku difraktogram untuk spesimen paduan FeCrNi tipe austenitik (A2) dan Tabel 3 parameter awal struktur paduan Austenitik-2.

Seluruh bahan memperlihatkan pola difraksi baja austenitik ( $\gamma$ -Fe), yang memiliki struktur kristal *fcc* dengan parameter kisi  $a = b = c = 3,59 \text{ \AA}$ . Terdapat lima buah refleksi yang merupakan puncak khas struktur austenitik, berturutan adalah bidang: (111), (200), (220), (311) dan (222) masing-masing pada sudut  $2\theta = 52,19^\circ, 61,05^\circ, 91,8^\circ, 114,8^\circ$  dan  $123,3^\circ$ . Difraktogram ini dalam analisis digunakan sebagai referensi awal untuk mendapatkan parameter  $d_0$ , dan diasumsikan jarak antar bidang kristal tidak terpengaruh proses rol panas. Perolehan data statistik memang cukup memadai bila dilihat dari *peak to background ratio* yang sangat tajam perbedaannya.



Gambar 2. Difraktogram spesimen baja austenitik tanpa rol panas (A2D0n)



Tabel 3. Parameter awal struktur paduan Austenitik-2

Data Kristalografi	$\gamma$ -Fe
Formula	Fe
Group Ruang	Fm3m (1-225)
Parameter Kisi: $a(\text{\AA})$	3,5936
$b(\text{\AA})$	3,5936
$c(\text{\AA})$	3,5936
$\alpha, \beta, \gamma(\text{deg.})$	90,90,90
Volume sel ( $\text{\AA}^3$ )	46,4076
Jumlah atom/sel satuan, Z	2
Posisi atom x, y, z	Fe 0,0 0,0 0,0 0,5 0,5 0,5

Dengan memasukkan parameter kristalografi yang sesuai, proses Rietveld *refinements* dilakukan secara simultan. Profil bentuk puncak fasa dimodelkan secara terpisah menggunakan fungsi *pseudo-Voigt*<sup>[7]</sup> yang merupakan kombinasi linier fungsi Gaussian dan Lorentzian. Cakupan data eksperimen yang memadai membolehkan parameter struktur fasa dihaluskan seperti: parameter kisi, parameter termal isotropis, simpangan titik nol, parameter anisotropis (*preferred orientation*), dan parameter profile. Penghalusan model fasa tunggal ini cukup valid untuk setiap spesimen, dengan *reliable factor*; *Rwp* berkisar antara 13%-15%; seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai kecocokan data pengamatan dan perhitungan (*Rwp* dan *S*) membesar akibat efek

fluoresensi bahan besi (baja) yang menyebabkan pola *background* melebar dan mempengaruhi statistika data yang kurang bagus. Penghalusan parameter kisi dan profil puncak untuk fasa austenitik ini sedikit bervariasi dari spesimen ke spesimen. Gambar 3 memperlihatkan pola struktur terhaluskan dengan tampilan reduksi yang mengindikasikan profil model sangat cocok dengan data eksperimen bagi seluruh spesimen tersebut. Gambar pola penghalusan Rietveld data struktur pada bahan A2D0n, A2D2n, A2D3n dan A2D5n ini dilakukan dengan sistem analisis struktur kristal umum; RIETAN94 yaitu sebuah *software* yang dikembangkan oleh F. Izumi<sup>[8]</sup>. Program ini yang mampu mengolah data difraksi yang diperoleh dengan sinar-X maupun neutron. Dalam gambar ada tanda *line broadening*; yaitu garis di bawah kedua pola; baku (merah) dan model (biru muda) yang mengindikasikan posisi puncak bidang fasa austenitik (hijau). Dapat ditunjukkan dengan jelas refleksi bidang (111), (200), (220), (311) dan (222) merupakan fasa kubik *fcc* yang mendominasi bahan paduan. Proses penghalusan dilakukan menggunakan fasa tunggal dengan grup ruang Fm3m (1-225)<sup>[9]</sup>. Tabel 3 menyusun data kristalografi awal struktur kristal austenitik-2 yang digunakan dalam proses penghalusan.

Tabel 4. Parameter hasil *refinements* spesimen paduan Austenitik-2

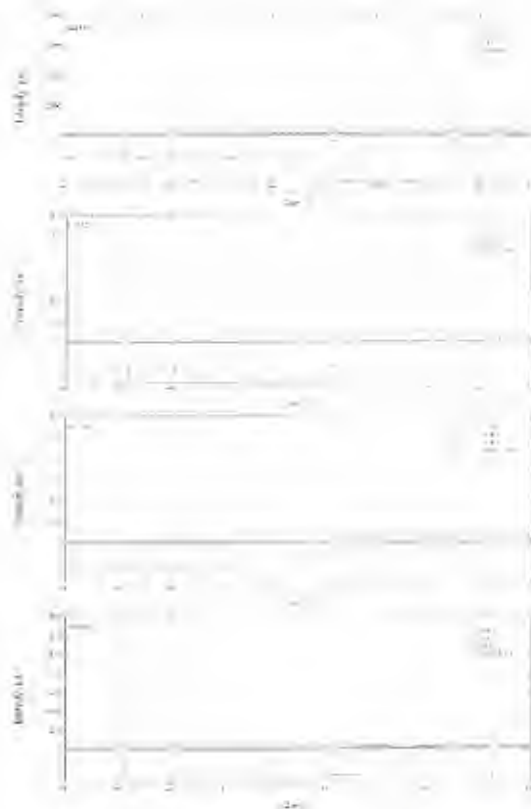
Reduksi (%)	Parameter Kisi-a ( $\text{\AA}$ )			
	A2D0n	A2D2n	A2D3n	A2D5n
0	3,5782(5)	-	-	-
71	-	3,5873(4)	-	-
81	-	-	3,5881(4)	-
87	-	-	-	3,5860(8)
Volume ( $\text{\AA}^3$ )	45,81(5)	46,16(6)	46,19(7)	46,11(7)
<i>Reliability factor</i>				
<i>Rwp</i> (%)	13,94	13,66	15,40	13,75

Hipotesis kuat pengaruh mekanisasi pengerolan adalah peristiwa *texturing* dalam bahan. Proses pengerolan dapat mengarahkan kristalisasi pada bahan ke suatu orientasi tertentu (*preferred orientation*) dari butir-butir logam yang acak. Tekstur ini umumnya digambarkan dengan *pole figure* yang

menunjukkan orientasi yang dominan, pada bidang kristal yang sejajar dengan permukaan pelat dan arah pengerolan. Peristiwa ini terlihat pada orientasi bidang refleksi (220) dalam Gambar 3. Dari spesimen A2D0n hingga A2D5n memperlihatkan ada perubahan

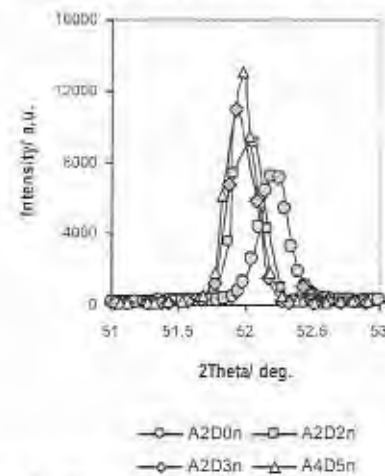
orientasi kristal ke arah bidang refleksi (220) dan penghalusan Rietveld agak sukar melakukan *fitting*. Intensitas hamburan neutron teramati meningkat hampir lipat tiga dari 31.865 *counts* hingga 84.024 *counts* dari spesimen A2D0n ke spesimen A2D5n. Peningkatan terendah sebesar dua kali, terjadi pada spesimen A2D5n dengan cacahan sebesar 62.683 *counts*.

Kehadiran unsur dopan/impuritas dalam sistem kristal austenitik dan proses mekanisasi rol panas dapat menimbulkan pergeseran struktur (*diffused structure*) dalam bahan paduan. Kedua faktor ini dapat mengganggu kesetimbangan *internal force* dalam sistem kristal bahan. Perbedaan tegangan *internal force* ini dikenal sebagai tegangan sisa (*residual stress*) dalam bahan. Fenomena ini dalam pola difraksi dapat diamati dari pergeseran dan pelebaran puncak profil.



Gambar 3. Hasil penghalusan Rietveld pada spesimen austenitik-2 rol panas; A2D0n, A2D2n, A2D3n, A2D5n hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%

Gambar 4 memperlihatkan pola pergeseran dan pelebaran struktur kristal bahan spesimen pada bidang refleksi (111) yang nilai angkanya disusun pada Tabel 5. Bidang refleksi (111) untuk spesimen A2D0n yang tidak diberi perlakuan rol panas berada pada posisi  $2\theta = 52,19^\circ$  dengan lebar setengah puncak (FWHM)  $0,242^\circ$ , namun ketika diberi perlakuan rol panas sebesar 71% reduksi, bidang refleksi mengalami pergeseran sebesar  $-0,10^\circ$  dengan perbedaan lebar setengah puncak sebesar  $-0,0187^\circ$ . Dinamika pengembangan penyusutan struktur kristal ini berlanjut hingga spesimen A2D5n yang diberi perlakuan rol panas sebesar 87% reduksi, yang bergeser hingga  $0,06^\circ$  dan selisih pelebaran  $-0,0625^\circ$ . Bahkan pergeseran terbesar terjadi pada spesimen A2D3n yang diberi perlakuan rol panas sebesar 71% reduksi, puncak bidang refleksi (111) berada pada posisi  $2\theta = 51,92^\circ$  dan selisih pelebaran puncak  $-0,0523^\circ$ .



Gambar 4. Pergeseran dan pelebaran puncak bidang (111) pada spesimen austenitik-2 rol panas; A2D0n, A2D2n, A2D3n, A2D5n hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%

Tabel 5. Angka pergeseran dan pelebaran puncak bidang (111) paduan Austenitik-2.

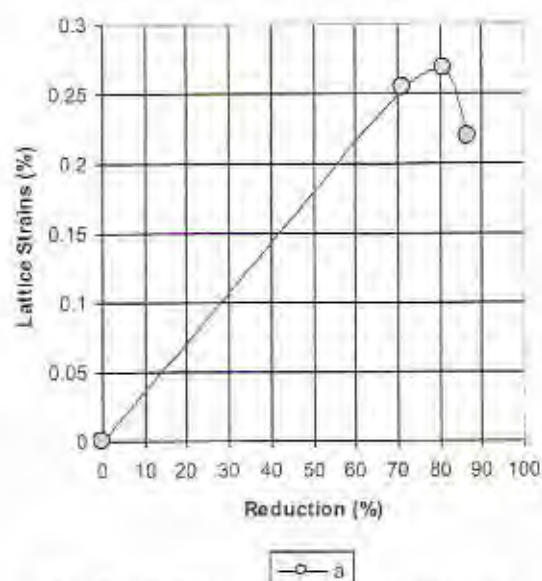
Spesimen	Pergeseran		Pelebaran	
	$2\theta(^{\circ})$	$\Delta 2\theta(^{\circ})$	FWHM( $^{\circ}$ )	$\Delta FWHM(^{\circ})$
A2D0n	52,19	0	0,2420	0
A2D2n	52,09	-0,10	0,2233	-0,0187
A2D3n	51,92	-0,17	0,1897	-0,0523
A2D5n	51,98	0,06	0,2509	0,0625



Jarak interplanar berbanding langsung dan dapat dihitung dari parameter kisi dengan hubungan  $d = a/\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ . Persamaan  $\varepsilon = (d - d_0)/d_0$  digunakan untuk menghitung regangan kisi rata-rata sepanjang arah kristalografi tertentu, dengan  $d$  dan  $d_0$  berturut-turut merupakan jarak kisi bahan tertegang, sedang kisi  $d_0$  adalah jarak kisi bebas tegangan (referensi). Dalam eksperimen ini, *fitting* terhadap data difraksi cukup baik ( $Rwp = 13-15\%$ ), diperoleh untuk setiap spesimen baja bahan karat. Hasil ini mengimplikasikan kepresisian data eksperimen. Pada kasus ini tensor regangan disesuaikan dengan simetri kristal. Jumlah komponen bebas dapat direduksi menjadi satu komponen bebas; yakni ke arah kisi- $a$ , oleh karena austenit merupakan struktur kristal uniaksial, hanya satu komponen yang diperlukan untuk menyatakan sifat-sifat secara lengkap<sup>[8]</sup>. Sepanjang arah lain, regangan dapat dihitung menggunakan aljabar tensor. Penentuan komponen regangan sepanjang arah sumbu prinsip sangat dianjurkan, adalah sumbu- $a$  untuk fasa austenit dalam aturan struktur konvensional. Hasil ini disusun dalam Tabel 4. Regangan hidrostatik  $\varepsilon$ , sepanjang arah dengan acuan pada arah spesimen, dapat dihitung dengan:  $\varepsilon_{av} = (1/4\pi) \int_{\Omega} \varepsilon_{hkl} d\Omega$  dengan  $\varepsilon_{hkl}$  adalah regangan dalam butiran yang arah  $[hkl]$ -nya terletak dalam arah yang diamati. Integrasi dilakukan untuk seluruh arah butiran secara random. Solusi untuk fasa austenit, persamaan tersebut menjadi  $\varepsilon_{av} = \varepsilon_a$ . Oleh karena fasa austenit bersifat uniaksial dan harga rata-ratanya menjadi sama dengan regangan kisi itu sendiri. Peregangannya kisi kristal dapat dihitung dengan menganalogikan persamaan  $\varepsilon = (d - d_0)/d_0$  menjadi  $\varepsilon_a = (a - a_0)/a_0$ .

Gambar 5 memperlihatkan kelakuan regangan kisi (*strain energy*) rata-rata dalam bahan struktur austenitik-2 akibat mekanisasi pengerolan panas. Saat bahan diberikan reduksi 71%, *strain energy* meningkat hingga 0,25% dan mencapai puncak sebesar 0,27% pada reduksi 81%. Peningkatan peregangannya kisi kristal ini terjadi akibat ada pergeseran bidang-bidang kristal (*slip plane*) oleh mekanisme pengerolan yang mampu meningkatkan kekuatan mekanik berupa penguatan regangan (*strain hardening*) bahan. Akan tetapi hukum distribusi normal (*Gauss distribution*) alamiah

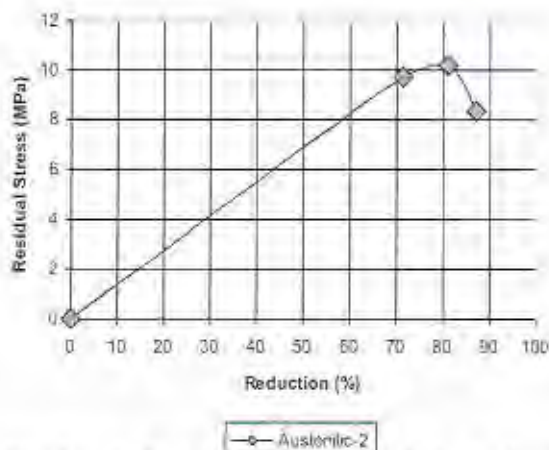
tetap berlaku ketika bahan mencapai titik leleh kekuatan. Fenomena ini terjadi juga pada bahan austenitik-2, yang mengalami penurunan peregangannya sebesar 0,23% meskipun reduksi pengerolan ditambah hingga 87%. Grafik di atas menginformasikan bahwa secara ekstrapolasi peregangannya kisi kristal berkecenderungan menurun walaupun reduksi terus bertambah. Hal ini boleh jadi disebabkan oleh nilai energi peregangannya rata-rata sudah melampaui batas bidang slip titik leleh maksimum, dan akan mengakibatkan kekuatan mekanik bahan menjadi berkurang.



Gambar 5. Regangan kisi baja struktur austenitik-2 rol panas, hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%

Regangan kisi rata-rata tersebut di atas diperoleh dari sebuah pola difraksi untuk daerah angular yang luas, yang mewakili beberapa regangan rata-rata banyak arah dalam bidang difraksi. Metode ini merupakan pengukuran tegangan hidrostatik yang merupakan komplementasi pengukuran tegangan sisa sepanjang arah orientasi tertentu seperti yang dilakukan dengan *Powder Diffractometer (PD-Stress)*. Tegangan hidrostatik,  $\sigma$ , dikaitkan dengan regangan hidrostatik<sup>[11]</sup> dalam persamaan;  $\sigma = (E/(1-2\nu))\varepsilon_{av}$ , dengan  $E$  adalah modulus Young dan  $\nu$  adalah pembandingan Poisson yang ditentukan dari pengukuran tersendiri. Parameter terregresi untuk bahan stainless steel 304 berurut-turut adalah 187 GPa dan 0,293<sup>[16]</sup>.





Gambar 6. *Residual stress* dalam baja struktur austenitik-2 rol panas, hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%

Gambar 6 merupakan grafik tegangan sisa akibat mekanisasi pengerolan panas, yang diperoleh dengan perumusan  $\sigma = [E/(1 - 2\nu)]\epsilon_{av}$ . Untuk kasus fasa tunggal baja struktur austenitik-2 (*fcc*), dengan harga  $\epsilon_{av} = \epsilon_a$ , fenomena kecenderungan distribusi tegangan sisa bahan struktur austenitik-2 hasil pengerolan adalah tegangan tarik (*tensile stress*). Pengerolan hingga reduksi 71% membangkitkan tegangan sisa tarik sebesar 9,7 MPa sedangkan tegangan sisa terbesar 10,2 MPa terjadi pada reduksi 81%. Selanjutnya tegangan sisa meluruh kembali hingga 8,3 MPa terjadi pada reduksi sebesar 87%. Kelakuan tegangan sisa bahan ini mengikuti kelakuan regangan kisi kristal (*strain energy*) rata-rata. Sesuai prediksi matematis, *slope* kenaikan tegangan sisa bahan antara reduksi 0% hingga 71% adalah sekitar 0,14. Hal ini berarti bahwa kenaikan tegangan sisa meningkat cukup tajam pada reduksi di bawah 71 %. Tegangan sisa bahan berangsur meningkat pada saat dilakukan proses pengerolan dan mencapai optimum sebesar 10,5 MPa pada reduksi ketebalan sekitar 77,3%. Di atas reduksi ini tegangan sisa akan menurun kembali dengan perbedaan *slope*/kemiringan sekitar -0,18.

## KESIMPULAN

Dari hasil analisis tegangan sisa bahan baja austenitik-2 yang diperlakukan rol panas dapat disimpulkan bahwa: Teknik difraksi dapat melakukan pengukuran tegangan sisa hidrostatik yang merupakan komplementasi dari pengukuran tegangan sisa sepanjang arah orientasi tertentu. Peningkatan peregang

bahan baja austenitik-2 terjadi akibat pergeseran bidang-bidang kristal (*slip plane*) oleh mekanisme pengerolan, yang mampu meningkatkan kekuatan mekanik berupa pengerasan regangan (*strain hardening*) bahan. Pengerolan hingga reduksi 71% membangkitkan peregang kisi sebesar 0,25% dan tegangan sisa tarik sebesar 9,7 MPa sedangkan peregang kisi sebesar 0,27% dan tegangan sisa terbesar 10,2 MPa terjadi pada reduksi pengerolan 81%. Selanjutnya peregang kisi dan tegangan sisa meluruh kembali berturut-turut hingga 0,23% dan 8,3 MPa terjadi pada reduksi pengerolan panas sebesar 87%. Fenomena kecenderungan distribusi tegangan sisa bahan struktur austenitik-2 hasil mekanisasi pengerolan panas adalah tegangan tarik (*tensile stress*).

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan tulus hati penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada; Ka. PTBIN: Drs. Gunawan, M.Sc., Ka. BBIN: Dr. Sudaryanto, M.Eng., Ir. Yuswono, M.Eng. APU., Heri Mugihardjo, A.Md., Imam Wahyono, S.ST., Sumaryo, A.Md. dan Drs. Antonius Sitompul, M.Sc. serta semua pihak yang langsung/tak langsung terkait.

## ARTI SIMBOL (NOMENCLATURE)

- A2D0n = spesimen tanpa rol panas
- A2D2n = spesimen dengan rol panas 71%
- A2D3n = spesimen dengan rol panas 81%
- A2D5n = spesimen dengan rol panas 87%
- % red = persen pengerolan panas (%)
- MPa = satuan tegangan ( $10^6$  Pa)
- GPa = satuan tegangan ( $10^9$  Pa)
- SS-304 = stainless steel 304
- FWHM = lebar setengah puncak (°)
- F1 = baja non standar feritik seri-1
- F2 = baja non standar feritik seri-2
- A1 = baja non standar austenitik seri-1
- A2 = baja non standar austenitik seri-2
- $\epsilon$  = peregang kisi kristal (%)
- $\sigma$  = tegangan sisa bahan (Pa)
- $d$  = jarak antar bidang tertegang (Å)
- $d_0$  = jarak antar bidang tak tertegang (Å)
- $E$  = Modulus elastisitas bahan (Pa)
- $\nu$  = rasio Poisson
- $\lambda$  = panjang gelombang (Å)
- $2\theta$  = sudut difraksi (°)
- %wt. = persen berat (%)
- Fe = unsur besi

Cr	= unsur krom
Ni	= unsur nikel
Mn	= unsur mangan
Si	= unsur silikon
C	= unsur karbon
Ti	= unsur titanium
S	= unsur sulfur/belerang
P	= unsur fosfor
V	= unsur vanadium
Cu	= unsur tembaga
Nb	= unsur niobium
°C	= satuan suhu (Celcius)
$\gamma$ -Fe	= gamma-Fe, berstruktur austenitik
a	= kisi arah sumbu-x (Å)
b	= kisi arah sumbu-y (Å)
c	= kisi arah sumbu-z (Å)
a	= kisi-a (Å)
Intensity	= cacahan/counts (a.u.)
$\alpha$	= sudut antara sumbu y dan z (°)
$\beta$	= sudut antara sumbu x dan z (°)
$\gamma$	= sudut antara sumbu x dan y (°)
Fm3m	= grup ruang kubus pusat muka
I-225	= indeks tabel kristalografi
Z	= jumlah atom/satuan sel
x	= posisi arah sumbu-x
y	= posisi arah sumbu-y
z	= posisi arah sumbu-z
fcc	= face centred cubic
$R_{wp}$	= nilai kecocokan data observasi-kalkulasi
h	= indeks bidang arah sumbu-x
k	= indeks bidang arah sumbu-y
l	= indeks bidang arah sumbu-z
$\Omega$	= simbol ruang terdefinisi

## DAFTAR PUSTAKA

- Almen, J.O. and P.H. Black., Residual Stresses and Fatigue in Metals, Mc Graw-Hill, New York, U.S.A, p.316, (1963).
- Parikin, Determination of Residual Stresses in Cold-Rolled 304 Stainless Steel Plates Using Diffraction Technique and Rietveld Analysis, a Thesis, QUT, Australia, (2000).
- Cullity, B.D., Introductions to X-ray Diffraction, 3<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, New York, U.S.A., p.387, (1995).
- Young, R.A., The Rietveld Method, IUCr Book Series 5, International Union of Crystallography, Oxford University Press, UK, (1997).
- Effendi, N., Austenitic Type Stainless Steel Production By Foundry Technology, Urania, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, PTBN-BATAN: 16 (2), 2010, p. 69 - 77. (2010).
- ASM Handbook, *Properties and Selection Iron, Steel, and High Performance Alloys*, 1, 10<sup>th</sup> ed., New York, (1990).
- Parlane, A.J.A., The Determination of Residual Stresses, Welding Institute, Cambridge, pp. 63-78, (1978).
- Izumi, F., *Rietveld Analysis System RIETAN, A Software Package for the Pattern Analysis and Simulation of X-ray and Neutron Diffraction Patterns*, Rigaku J.6, No.1,10, Japan, (1994).
- Villars, P., and L.D. Calvert, *Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases*, 2<sup>nd</sup> edition, Vol.3 & 4, pp. 3824-6 and pp. 4471-2, ASM International, USA, (1991).
- Nye, J.F., *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, Oxford, UK, (1985).
- Noyan, J.C. & Cohen, J.B., *Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlaag, New York, (1987).